

УДК 519.62

Повышение точности оценок индуктивностей микрополосковых линий*

С.П. НОВИЦКИЙ, М.Г. РУБАНОВИЧ

Повышение точности оценок измеренных значений индуктивностей микрополосковых линий (МПЛ) от ширины полоска достигнуто вследствие применения аппарата адаптивной фильтрации Калмана, при этом в качестве предсказанных значений использовались данные наиболее точного метода расчета индуктивностей – метода токовых полос (ТП).

Ключевые слова: оценка, погрешность, доверительный интервал, фильтр Калмана, микрополосковая линия.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] выполнено сравнение погрешностей расчетов индуктивностей L МПЛ от ширины полоска b , т. е. $L(b)$ для семи аналитических методов. Полученные расчетные значения индуктивностей для каждого из этих методов сравнивались с экспериментально измеренными. Авторами [1] было изготовлено 10 МПЛ равной длины, отличающихся шириной полоска. Значение индуктивности МПЛ определялась как разность измеренных значений индуктивностей МПЛ с держателем и собственно держателя. Естественно, что данные измерений, как и данные расчетов, содержат ряд погрешностей, обусловленных неточностью изготовления отдельных полосков МПЛ, погрешностями измерений их геометрических параметров (шумы источника), так и погрешностями косвенного определения индуктивностей МПЛ (шумы измерения). В [1] определялось максимальное расхождение расчетных значений индуктивностей с экспериментальными данными, а также доверительные интервалы и их границы для каждого из методов. Установлено, что наименьшее расхождение с экспериментом и наименьший доверительный интервал имеет аналитический метод ТП в варианте с разбиением микрополоска в продольном направлении на 8 токовых полос.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В [1] показано, что экспериментальные данные индуктивности от ширины полоска b , т. е. $L(b)$, хорошо совпадают с данными экспоненциальной сплайн-функции

$$L(b) = a_1 e^{a_2 b} + a_3, \quad (1)$$

где $L(b)$ – расчетное значение индуктивности МПЛ от ширины полоска. С учетом полученных в [1] значений a_1 , a_2 , a_3 уравнение (1) преобразовано к виду

$$L(b) = 114,32e^{-0,4x} + 43,86. \quad (2)$$

* Статья получена 15 июня 2012 г.

Результаты измеренных значений индуктивности МПЛ и рассчитанных по уравнению (2), а также вычисленных значений индуктивностей по методу ТП (для восьми продольных токовых полос), и их доверительные интервалы, представлены на рис. 1.

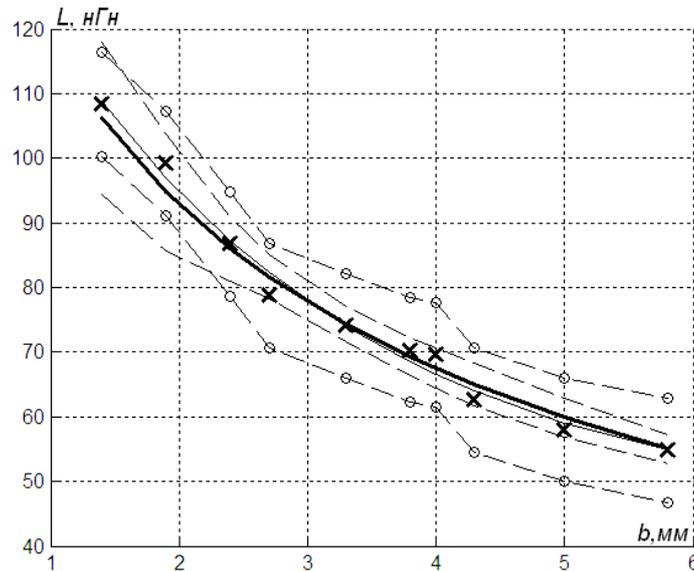


Рис. 1. Зависимости индуктивности МПЛ от ширины полоска b , мм:
 $\times - \times$ – результаты эксперимента и границы его доверительного интервала
 $o - o -$, равного $\pm 3\sigma_1$; — — расчетные значения индуктивности МПЛ,
 полученные методом ТП и границы его доверительного интервала $\pm 3\sigma_2$ –
 штриховые линии; жирная сплошная линия — — значения индуктивностей
 МПЛ, полученные по уравнению (2)

Из рис. 1 видно, что индуктивности МПЛ, рассчитанные методом ТП (тонкая сплошная линия) с доверительными интервалами $\pm 3\sigma_2$, и индуктивности МПЛ, рассчитанные по уравнению сплайн-функции (2) — (жирная линия), расположены внутри доверительного интервала $\pm 3\sigma_1$ экспериментально измеренных индуктивностей отрезков МПЛ. Различие в величине доверительных интервалов, приведенных на рис. 1, объясняется тем, что экспериментальные результаты и, следовательно, сплайн-функция (2), отягчены шумами источника и измерения, а расчетные значения индуктивности МПЛ, вычисленные с использованием метода ТП [1], — отягчены лишь шумами источника.

Целью настоящей работы являлось выяснение возможности применения фильтра Калмана для повышения точности оценок экспериментально измеренных индуктивностей МПЛ.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Применение фильтра Калмана, согласно [2], предусматривает выполнение следующих операций:

– предсказания индуктивности $\hat{L}(b_k | b_{k-1})$ и ее дисперсии $D(b_k | b_{k-1})$ по предшествующим данным:

$$\hat{L}(b_k | b_{k-1}) = A_k \hat{L}(b_{k-1} | b_{k-1}), \quad b \in [b_0, b_N]; \quad (3)$$

$$D(b_k | b_{k-1}) = A_k \cdot D(b_{k-1} | b_{k-1}) \cdot A_k^T + Q(b_k); \quad (4)$$

– вычисление коэффициента усиления фильтра Калмана на каждом шаге фильтрации:

$$K(b_k) = D(b_k | b_{k-1}) \cdot h^T \cdot [R(L_k) + h \cdot D(b_k | b_{k-1}) \cdot h^T]^{-1}; \quad (5)$$

– получение текущих данных и их дисперсии на выходе фильтра:

$$\hat{L}(b_k | b_k) = \hat{L}(b_k | b_{k-1}) + K(b_k) \cdot [L(b_k) - h \cdot \hat{L}(b_k | b_{k-1})]; \quad (6)$$

$$D(b_k | b_k) = D(b_k | b_{k-1}) - K(b_k) \cdot h \cdot D(b_k | b_{k-1}). \quad (7)$$

В уравнениях (3) – (7) введены следующие обозначения:

A_k – коэффициент линейного преобразования предыдущего фильтрационного значения индуктивности в предсказываемое значение,

$D(b_k | b_k)$ – дисперсия фильтрационной (выходной) оценки индуктивности,

$Q(b_k)$ – дисперсия из-за разброса параметров МПЛ (шумы источника),

$R(L_k)$ – дисперсия ошибок измерений индуктивности (шумы измерителя),

$\hat{L}(b_k | b_k)$ – оценка индуктивности на выходе фильтра Калмана,

h – весовой коэффициент измерения,

T – операция транспонирования.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Геометрические размеры МПЛ на диэлектрике с металлизированным основанием измерялись штангельциркулем. При использовании нониуса ширина МПЛ и толщина диэлектрика измерялись с точностью до $\pm 0,05$ мм. Погрешность измерения длины полоска МПЛ не учитывалась, так как отклонение его длины на $\pm 0,05$ мм составляет пренебрежимо малую часть относительной среднеквадратичной погрешности измеряемой индуктивности.

При выполнении процедуры фильтрации Калмана использовались аддитивные рандомизированные шумы с дисперсиями, равными дисперсиям шумов источника и измерений. Суммарная дисперсия индуктивности МПЛ в методе ТП от неточности измерения геометрических размеров полосок и высоты подложки определялась как дисперсия независимых случайных величин, т.е. она принималась равной сумме этих дисперсий [3].

Калмановская фильтрация осуществлялась с помощью специального алгоритма, разработанного авторами в среде MATLAB –2007b. В качестве предсказанных значений в фильтре Калмана при вычислении значений индуктивности использовались данные метода ТП, а в качестве текущих значений индуктивностей $L(b)$ – данные измерительного эксперимента.

ФИЛЬТР КАЛМАНА:

```
for i = 1:10
x(i+1) = met508(i+1);
```

% Счет шагов (элементов) в фильтре Калмана.

% Значения индуктивностей $x = L$ метода 508 (метод ТП при числе полосок, равном 8).

```

A(i+1) = x(i+1)/x(i);           % A – коэффициент относительного приращения
                                % индуктивности за один шаг фильтрации.
P(i+1) = A(i)*P(i)*A(i)+Q(i);   %Вычисление текущей дисперсии фильтрации.
K(i+1) = P(i+1)*H'*inv(H*P(i+1)*H'+R); % Вычисление коэффициента
                                % усиления фильтра Калмана.
                                % Коррекция индуктивности МПЛ, основанная
                                % на предсказании:
x(i+1) = x(i+1) + K(i+1)*(z(i+1)-H*x(i+1)); %Выход фильтра Калмана.
P(i+1) = P(i+1) - K(i+1)*H*P(i+1); %Выход дисперсии фильтра Калмана.
End

```

Результаты работы этого алгоритма отражены на рис. 2.

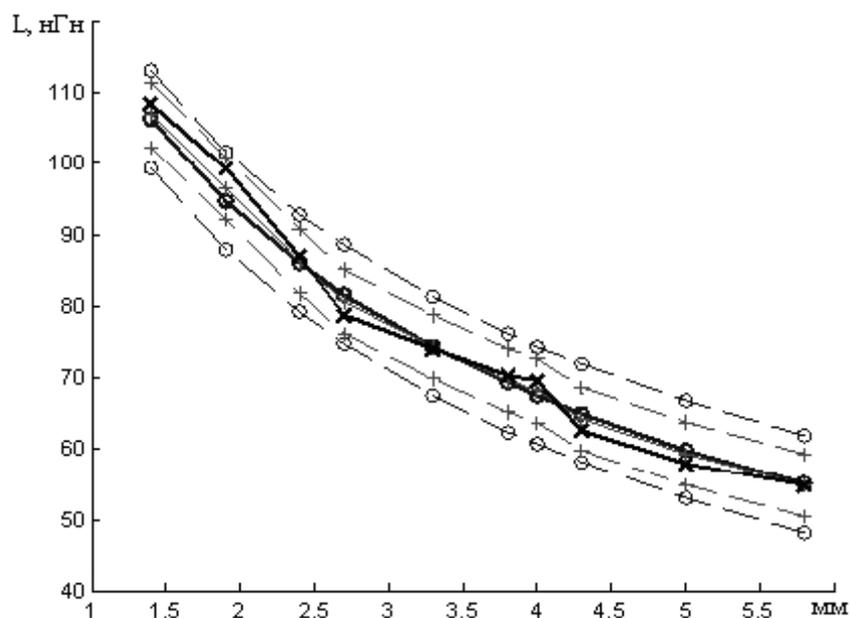


Рис. 2. Зависимости $L(b)$:

экспериментальная (\times — \times); фильтр Калмана: $+m$ — крестики и пурпурная сплошная линия, $+m$ — пурпурные крестики и штриховые линии — границы доверительного интервала фильтра Калмана; метод ТП: ob — синие кружочки и полужирная сплошная синяя линия, ob — синие кружочки и штриховые синие линии — границы доверительного интервала метода ТП

На рис. 2 видно, что доверительный интервал выходных данных калмановского фильтра находится внутри доверительного интервала метода ТП. Это однозначно указывает, что фильтр Калмана, в котором в качестве предсказанных значений используются данные метода ТП, а в качестве текущих значений — данные измерительного эксперимента, дает более точную оценку измеренных значений индуктивности МПЛ, чем обычные усредненные измерения.

Ниже в таблице приведены значения индуктивностей для 10 полосков МПЛ разной ширины. Длина всех полосков приведена к 200 мм.

Таблица

Значения интегральных индуктивностей МПЛ (нГн) и их отклонений

Ширина полоска МПЛ, мм	Данные измерительного эксперимента	Данные сплайн-функции	Выходные данные фильтра Калмана	Отклонение данных фильтра Калмана от эксперимента	Данные метода ТП с разбиением полоска на 8 полосок	Отклонение данных метода ТП от эксперимента
1.4	108.4	108.84	106.9069	-1.4931	106.2367	-2.1633
1.9	99.2	96.97	96.5309	-2.6691	94.7250	-4.4750
2.4	86.8	87.27	86.2888	-0.5112	85.9738	-0.8262
2.7	78.8	82.32	80.6239	1.8239	81.6354	2.8354
3.3	74.1	74.05	74.2653	0.1653	74.3484	0.2484
3.8	70.3	68.54	69.6075	-0.6925	69.2975	-1.0025
4.0	69.6	66.54	68.1259	-1.4741	67.4956	-2.1044
4.3	62.6	64.03	64.2621	1.6621	64.9853	2.3853
5.0	58.0	59.07	59.3069	1.3069	59.8649	1.8649
5.8	54.8	54.87	54.9435	0.1435	55.0015	0.2015

ВЫВОДЫ

Использование фильтра Калмана для фильтрации и сглаживания экспериментальных данных индуктивностей МПЛ правомерно. Фильтр Калмана обеспечивает, в сравнение с методом ТП [1], более близкое приближение фильтрационных значений (оценок) к экспериментальным данным и имеет, в сравнении с методом ТП, меньший доверительный интервал. Следовательно, экспериментальные данные, подвергнутые калмановской фильтрации, можно принимать в качестве уточненных оценок значений индуктивностей МПЛ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Воробьев П.М.** Использование фильтра Калмана для уточнения результатов измерительного эксперимента. Сб. тр. Междунар. научно-техн. конф. Информатика и проблемы телекоммуникаций / П.М. Воробьев, С.П. Новицкий, М.Г. Рубанович. – Новосибирск: СибГУТИ, 2011. – С. 300–301.
- [2] **Абденова Г.А.** Оценка параметров и характеристик шумов нестационарных процессов в стохастических системах, описываемых в пространстве состояний / Г.А. Абденова, А.А. Воевода // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – № 3 (61). – С. 11–18.
- [3] **Зайдель А.Н.** Погрешности измерений физических величин / А.Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1985. – 112 с.

Новицкий Станислав Поликартович, профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств НГТУ, доктор технических наук. Основное научное направление: измерение параметров сложных электрических объектов. Имеет более 250 научных работ, в том числе монографию, 40 авторских свидетельств, 10 учебных пособий. E-mail: novitskiysp@mail.ru

Рубанович Михаил Григорьевич, доцент и докторант кафедры электронных приборов НГТУ, кандидат технических наук. Основное научное направление: измерение параметров радиотехнических объектов в области ВЧ и СВЧ. Имеет более 120 научных работ, в том числе монографию, 9 авторских свидетельств, 4 учебных пособия. E-mail: mihail-nstu@mail.ru

Novitskiy S.P., Rubanovich M.G.

Increase accuracy of estimations inductance of microstrip lines

Increase of accuracy of estimations of the measured meanings inductance microstrip of lines from width of strip, is achieved owing to application of the device of an adaptive Kalman filter, thus as the predicted meanings the data of the exactest method of account inductance - method current of strips were used.

Key words: Estimation, error, confidential interval, Kalman filter, microstrip line.